

东南大学电工电子实验中心

实 验 报 告

课程名称: 电路实验

第 6 次实验

实验名称: 交流电路认识及参数测试
院 (系): 电气工程学院 专 业: 电气工程及其自动化
姓 名: 王皓冬 学 号: 16022627
实 验 室: 103 室 实验组别: _____
同组人员: 无 实验时间: 2023 年 12 月 11 日
评定成绩: _____ 审阅教师: _____

一、实验目的

- (1) 掌握低通、高通、带通电路、带阻电路的频率特性；
- (2) 应用 Multisim 软件测试低通、高通、带通电路、带阻电路及有关参数；
- (3) 掌握 Multisim 软件中的交流分析功能测试电路的频率特性；
- (4) 掌握电路谐振及其特征；
- (5) 掌握 RLC 串联谐振现象观察、测量方法。

二、实验原理（预习报告内容，如无，则简述相关的理论知识点。）

1. 预习相序判断的方法，并简述原理。

(1) 查阅相关资料，了解 Multisim 分析功能。

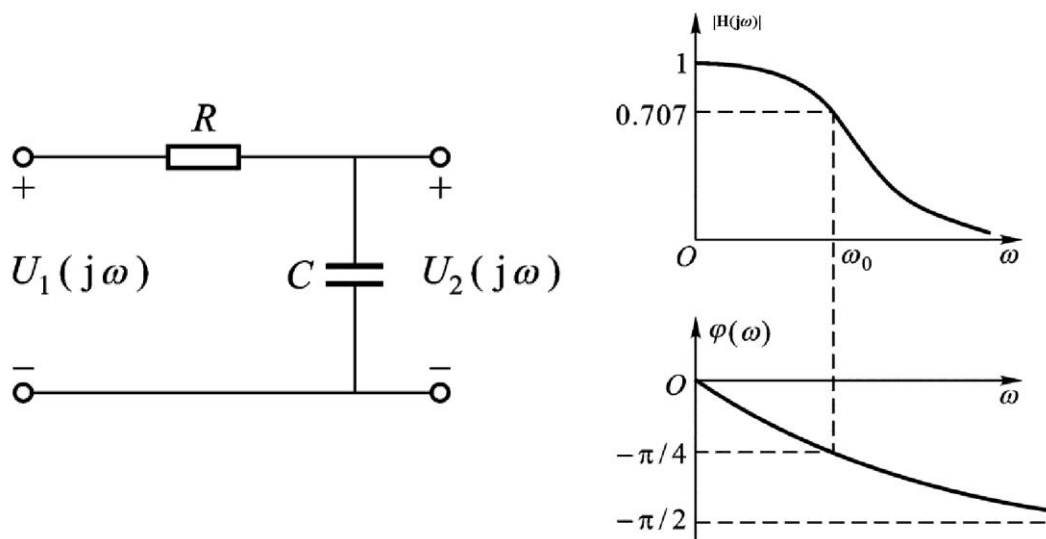
(2) 复习一阶 RC 电路频率特性，完成内容 1。（预习报告的实验部分均见实验内容）

1) 网络频率特性的定义网络的响应向量与激励向量之比是频率的函数，称为正弦稳态下的网络函数。表示为

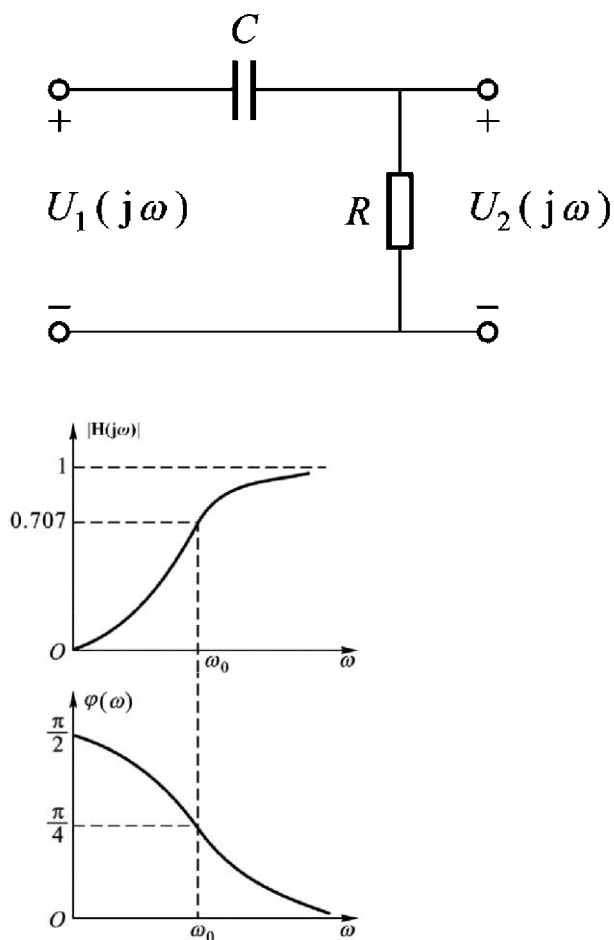
$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = |H(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$$

其模 $|H(j\omega)|$ 随频率变化的规律称为幅频特性，相角 $\varphi(\omega)$ 随频率变化的规律称为相频特性，后者表示了响应与激励的相位差与频率的关系。根据 $|H(j\omega)|$ 随频率变化的趋势，将 RC 网络分为“低通电路”、“高通电路”、“带通电路”、“带阻电路”等。

2) 一阶 RC 低通电路频率特性曲线



3) 一阶 RC 高通电路频率特性曲线



2. 谐振电路的原理知识

RLC 串联电压谐振

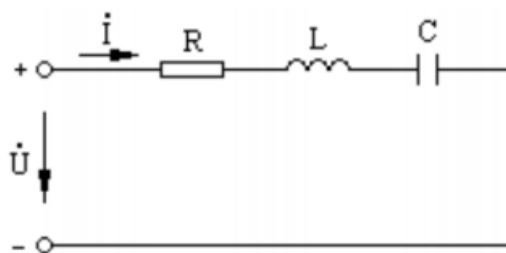


图 3 RLC 串联电路

当感抗等于容抗时，电路的电抗等于零。即 $X_L = X_C$; $\omega L = \frac{1}{\omega C}$; $2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$;

$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 则 $\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} = 0$; 即电源电压 \dot{U} 电路中电流 \dot{I} 同相。

谐振时频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$; 角频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; 周期 $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$

2) RLC 串联电压谐振特征

① 电路的阻抗

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} =$$

电路对电源呈现电阻性，电源供给电路的能量全部被电阻所消耗，电源与电路之间不发生能量互换。能量互换只能发生在电感线圈 L 与电容器 C 之间。

②电路的电流

当电源电压 U 不变的情况下，如下图 4 所示，电路的电流将在谐振时达到最大值，电流的大小取决于电阻 R 的大小，电阻 R 越小电流越大。反之电流越小。

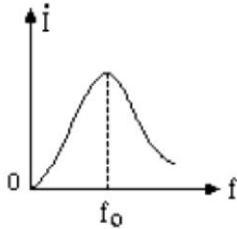


图 4 电流随频率变化曲线

③电路的电压

$\dot{U} = \dot{U}_R$ 由于 $X_L = X_C$ ，则 $\dot{U}_L = \dot{U}_C$ ，如下图所示， \dot{U}_L 、 \dot{U}_C 在相位上相反，互相抵消，对整个电路不起作用，因此电阻 R 上电压 \dot{U}_R 等于电源电压 \dot{U} 。

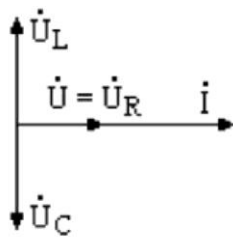


图 5 串联谐振向量图

\dot{U}_L 、 \dot{U}_C 单独作用不容忽视，因为 $\dot{U}_L = I X_L = \dot{U}_R \frac{X_L}{R}$ ， $\dot{U}_C = I X_C = \dot{U}_R \frac{X_C}{R}$ ，当 $X_L = X_C > R$ 时， \dot{U}_L 、 \dot{U}_C 都大于电源电压 \dot{U} ， $X_L = X_C < R$ 时， \dot{U}_L 、 \dot{U}_C 都小于电源电压。当 $X_L = X_C \gg R$ 时， \dot{U}_L 、 \dot{U}_C 将远远高于电源电压多少倍。

④电路的品质因数 Q

$$Q = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}} = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \omega_0 L / R$$

品质因数 Q 也是由电路的参数决定的，当 L 、 C 一定， R 值越小， Q 值越大，谐振曲线越尖锐， R 值越大， Q 值越小，谐振曲线越平坦。

(5) 理论计算内容 4 RLC 串联电路的谐振频率。

实验内容 4: RLC 串联谐振电路测量

(1) $R=2k\Omega$ ， $L=330\mu H$ ， $C=3.3nF$ ，激励电压 $4V_{RMS}$ 。

该条件下电路的串联谐振频率

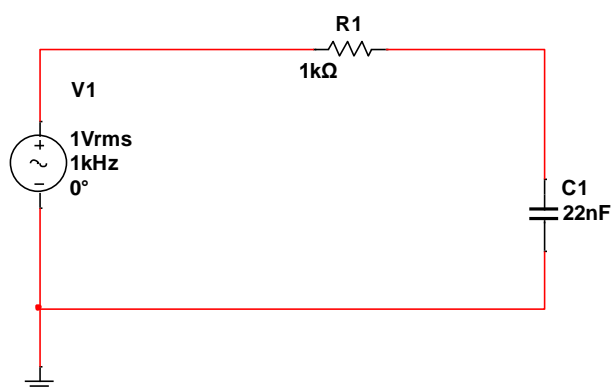
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 152.5kHz$$

与激励电压无关。

三、实验内容

1. 用 Multisim 分析功能测试一阶 RC 低通电路的频率特性

用上述方法分别测试 $0.01f_0$ 、 $0.1f_0$ 、 $0.5f_0$ 、 f_0 、 $5f_0$ 、 $10f_0$ 、 $100f_0$ 点所对应的 $|H(j\omega)|$ 和 ϕ 的值。



测量结果如下。其中，为更加精确，游标对应值的更改是通过 set 实现的，而不是移动。

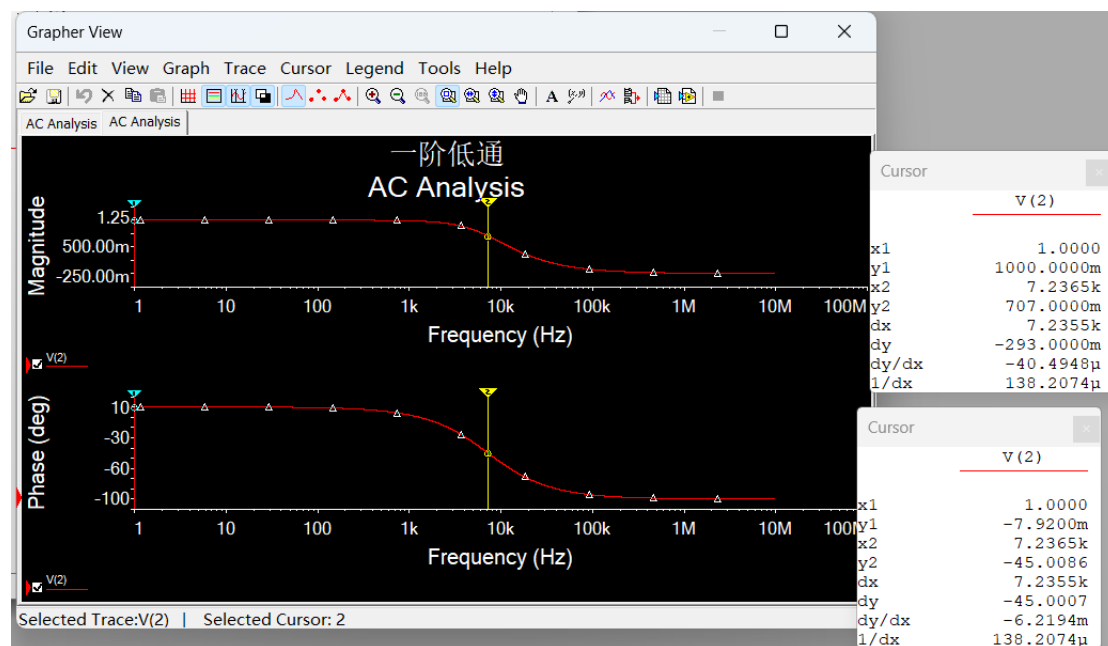


表 1 一阶 RC 低通电路频率特性测量

测量	$0.01f_0$	$0.1f_0$	$0.5f_0$	f_0	$5f_0$	$10f_0$	$100f_0$
$H(j\omega) (m)$	999.9500	995.0335	894.3707	707.0000	196.0592	99.4740	9.9965
$\varphi(^{\circ})$	-573.1513m	-5.7127	-26.5723	-45.0086	-78.6934	-84.2911	-89.4272

2. 设计一阶高通电路，用 Multisim 分析测试其频率特性（验收）

设计一个一阶高通电路，要求 f_0 在 1.6kHz 左右。设计电路，并分析测量电路 f_0 值。记录电路频率特性曲线。

理论推导：记电流相量为 $I \angle 0^{\circ}$ ，则

$$\dot{U}_{oc} = I \cdot \frac{1}{j\omega C} = I \cdot \frac{1}{\omega C} \angle -90^{\circ}$$

$$\dot{U} = I \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) = I \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} \right)^2} \cos \theta$$

其中

$$\tan\theta = -\frac{1}{\omega CR} = -\frac{1}{2\pi fCR}$$

则转移电压相位差

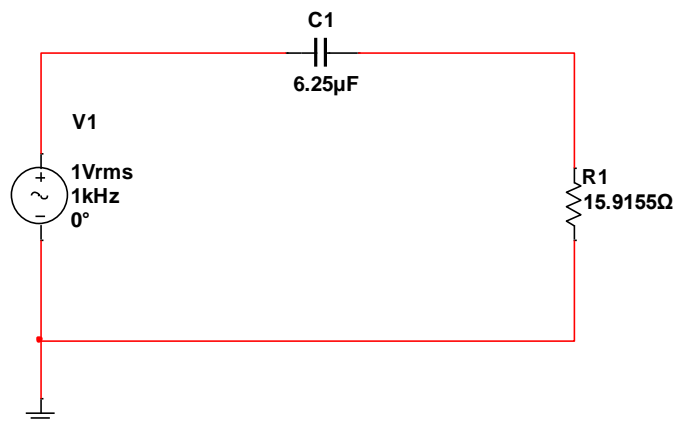
$$\varphi = -90^\circ - \theta = -45^\circ$$

即 $\theta = -45^\circ$ 。

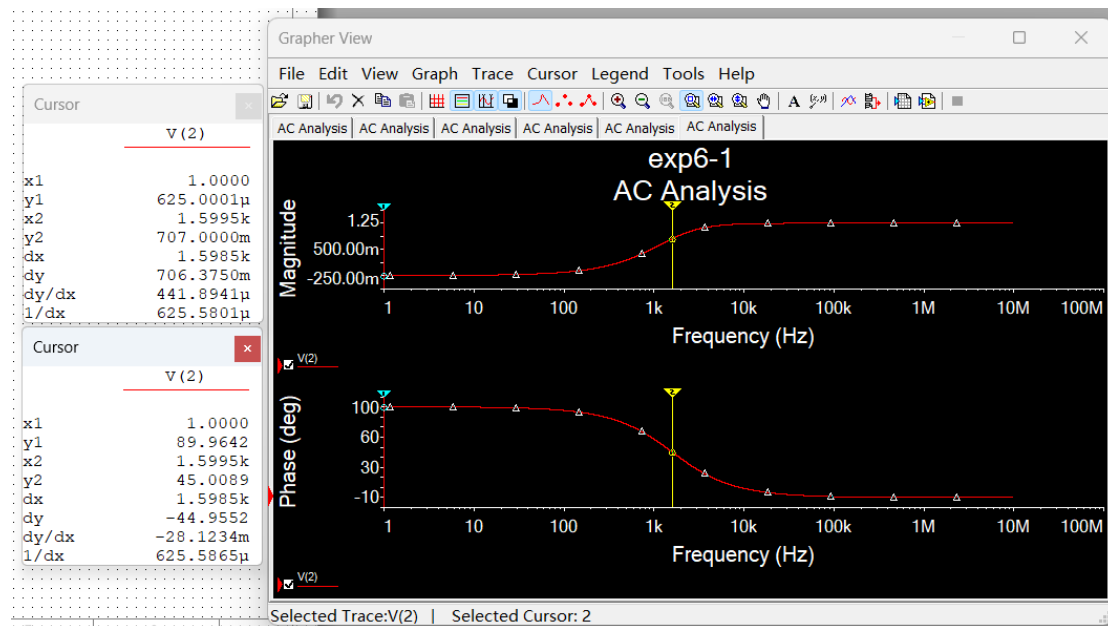
因此，取 $R = \frac{100}{2\pi} \Omega$ ， $f = 1.6\text{kHz}$ ，应有

$$C = 6.25\mu\text{F}$$

据此设计电路如下。（有结点序号时无法复制电路图，故图中去掉了结点）



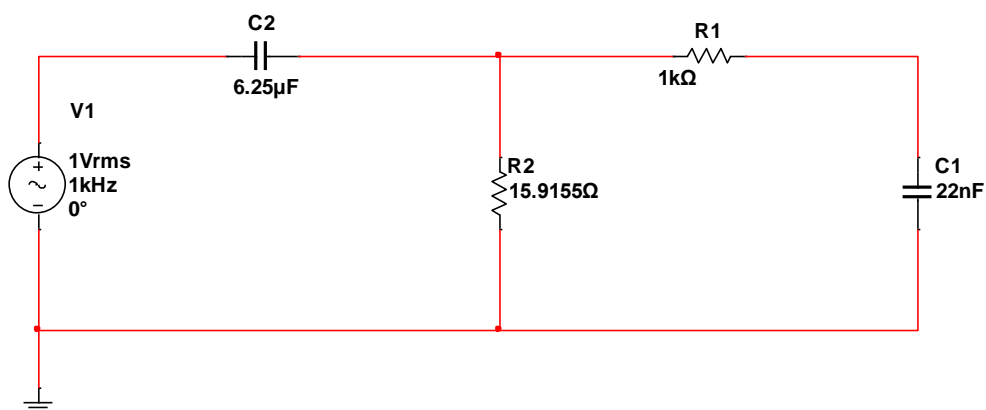
其分析结果如下。



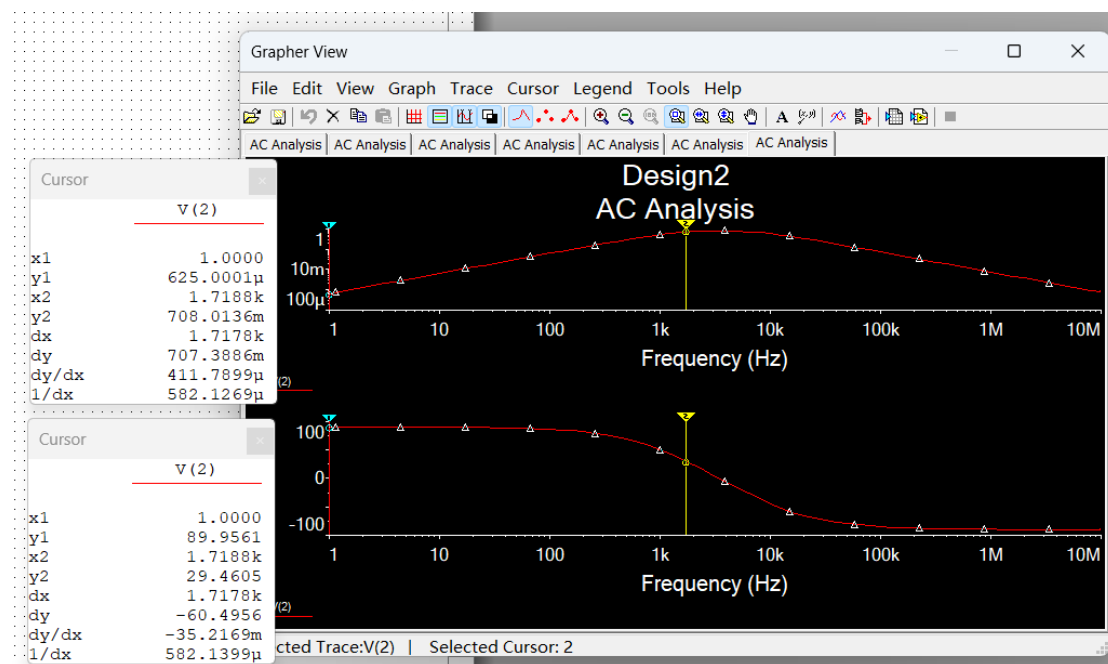
可以看到， $f_0 = 1.5995\text{kHz} \approx 1.6\text{kHz}$ ， $\varphi = -44.9552^\circ \approx -45^\circ$ ，设计正确。

3. 将内容 2、1 电路串联，用 Multisim 测试其电路的频率特性，并进行说明分析。（验收）

串联电路如图。



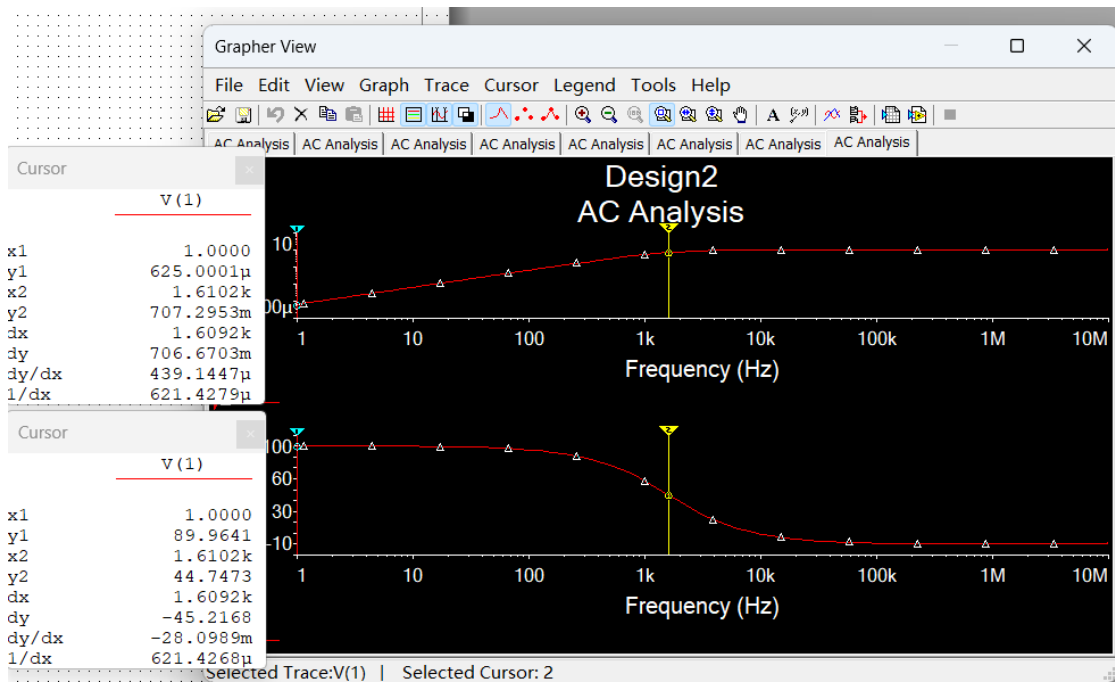
对应 V2 结点（即 C1 上方结点）幅频、相频曲线如图。



可以看到，相频特性曲线未发生明显变化；而幅频特性曲线的高频部分与低频部分被明显抑制。这说明，该电路综合了低通、高通电路的两种特性，对两端的频率均有抑制效果，仅允许特定频率的信号通过，即带通电路。

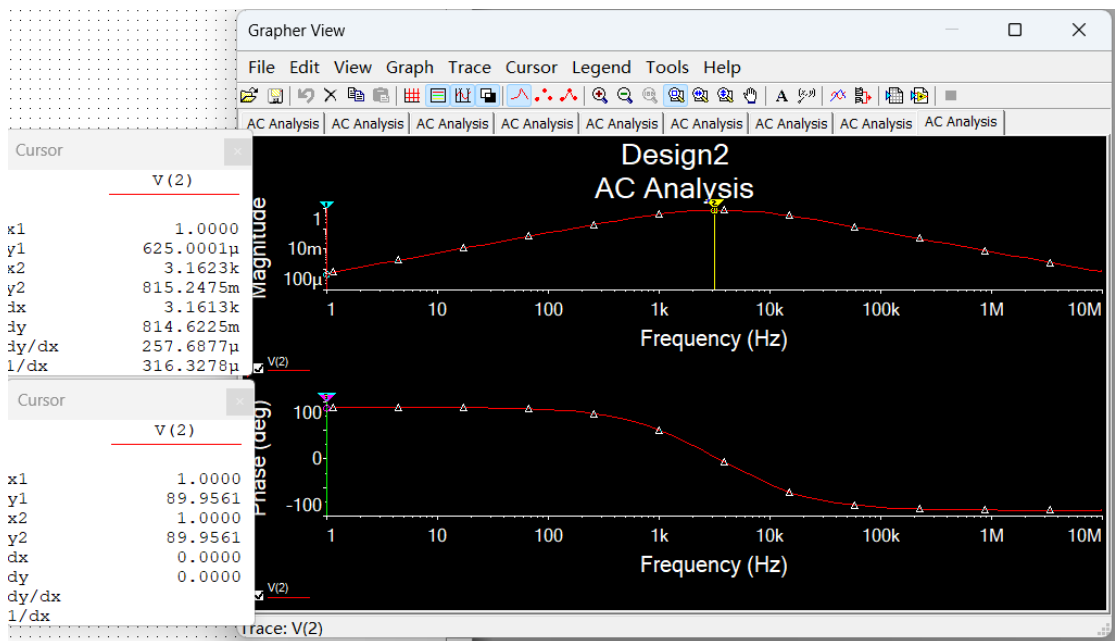
V2 结点 $f_0 = 1.7188\text{kHz}$, $\varphi = 29.4605^\circ$, f_0 值略高于原电路。

进一步分析，原高通电路的输出端 V1:



其 $f_0 = 1.6102\text{kHz}$, $\varphi = 44.7473^\circ$, f_0 值与原高通电路 (1.5995kHz) 无明显差别, 而产生明显相移。

带通部分幅度极大值 (峰值):



对比发现, 即使在峰值处, 信号仍被部分截止。

这说明, 原低通电路部分仍保留了一部分滤高频信号的能力; 带通的通过信号是相对的, 事实上允许通过的信号也可能被部分截止。

4. RLC 串联谐振电路测量

(1) $R=2\text{k}\Omega$, $L=330\mu\text{H}$, $C=3.3\text{nF}$, 激励电压 4VRMS 。

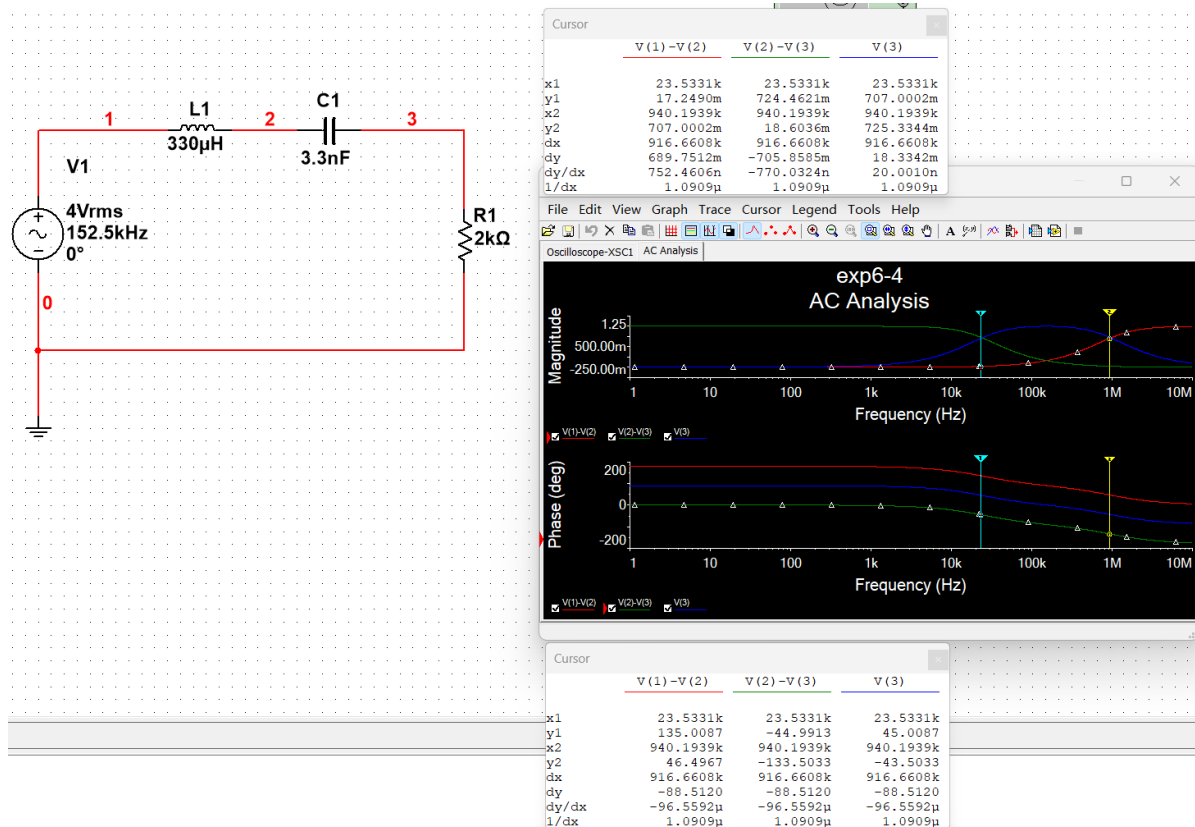
(2) 用 Multisim 软件仿真, 观察记录 U_R 、 U_L 、 U_C 随激励信号频率变化而变化的规律, 分析实验现象的理论依据。测量谐振频率点 U_R 、 U_L 、 U_C 值及波形。

(验收)

理论推导：该条件下电路的串联谐振频率

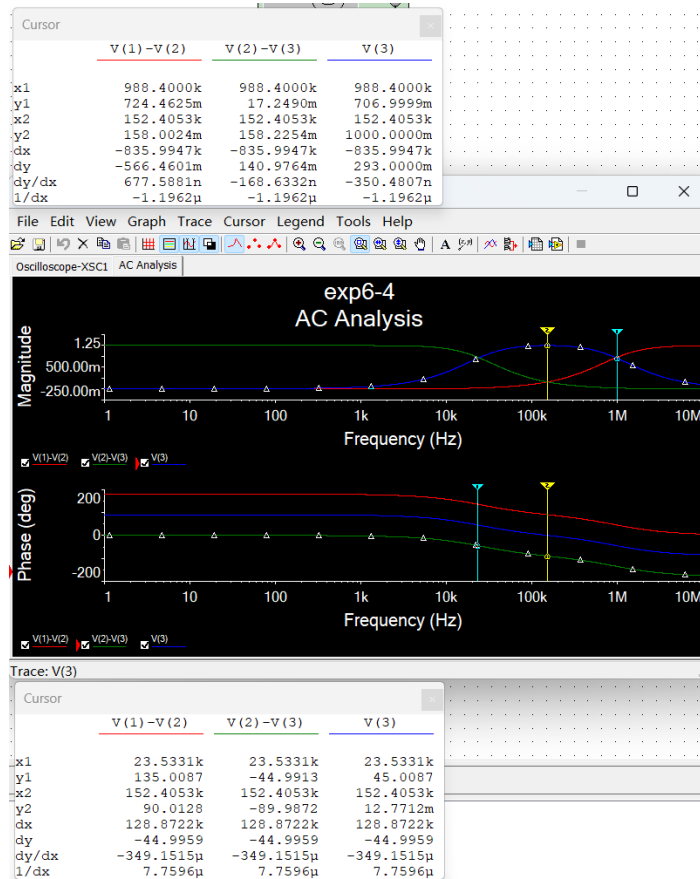
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 152.5\text{kHz}$$

U_R 、 U_L 、 U_C 幅频特性与相频特性如图。

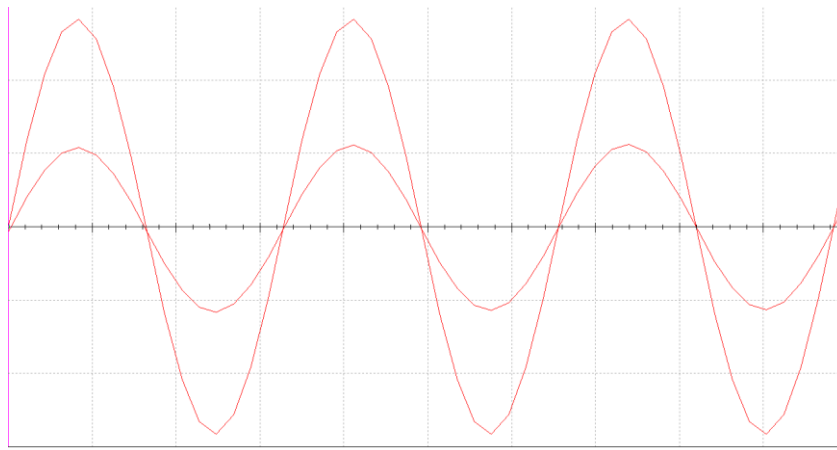


可以看到， U_L 、 U_C 的 f_0 分别为 940.1939kHz、23.5331kHz，对应幅角 46.4967、-44.9913。

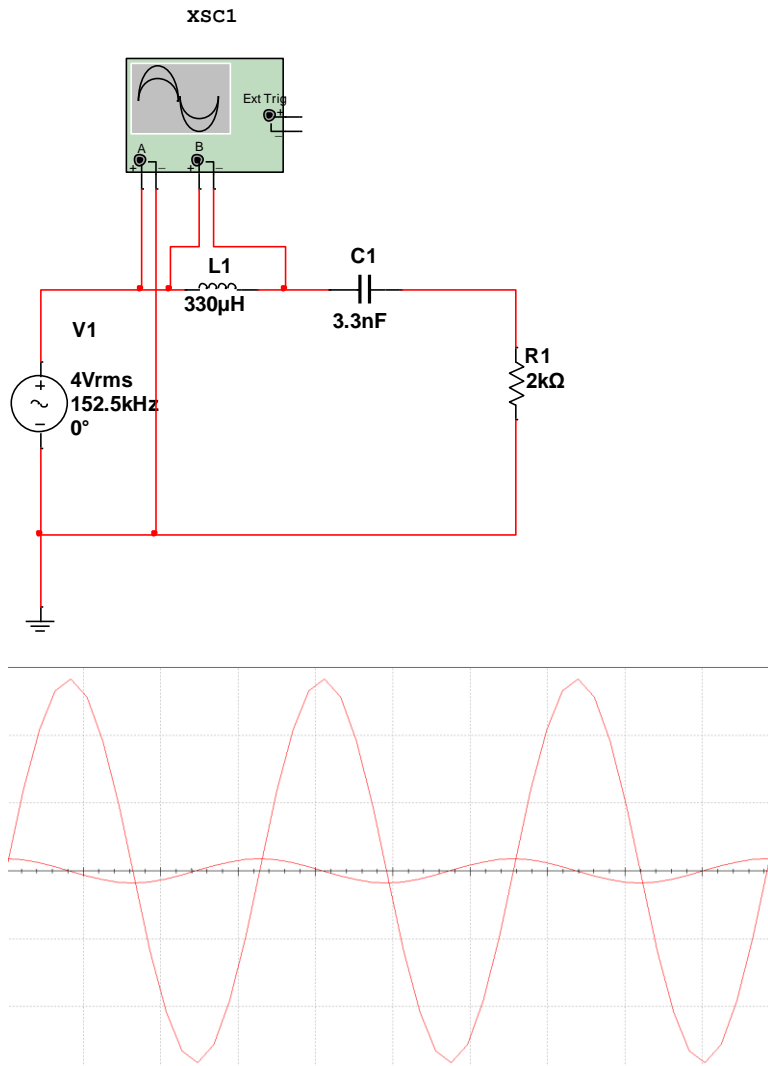
当频率小于谐振频率时，随着信号源频率的增大 U_C 逐渐增大， U_L 、 U_R 不变，当频率达到谐振频率时， U_R 、 U_L 、 U_C 达到最大值。当频率大于谐振频率时， U_L 逐渐减小， U_C 、 U_R 不变。



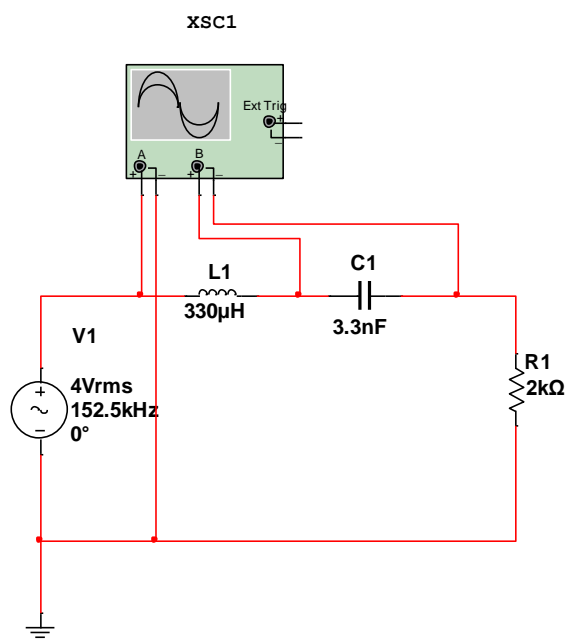
同时， U_R 的 f_0 为 152.4052kHz，幅角 12.7112m，即约为 0。

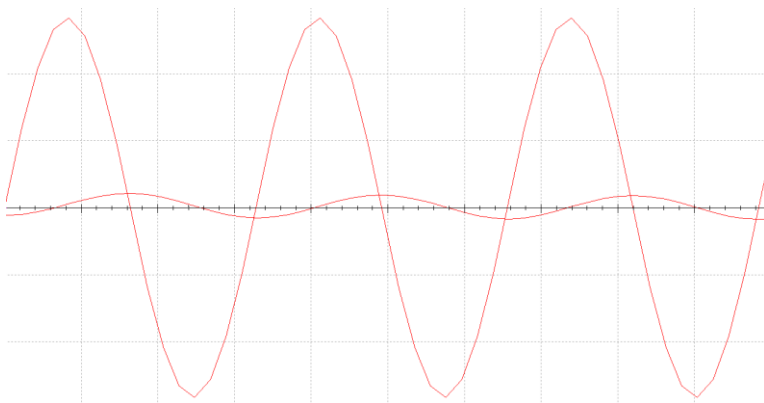


电感：



电容：





电容电压落后电源电压 $\frac{\pi}{2}$ ，电容电压落后电源电压 $\frac{\pi}{2}$ ，值均远大于电源电压；电阻电压与电源电压同相，值略大于电源电压。

记录各元件电压波形峰峰值如下表所示：

f_0	U_R	U_L	U_C
152.5kHz	11.290V	1.807V	1.840V

理论计算：假设此时恰谐振，则

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_{rms}}{R}$$

则电容上电压

$$\dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C} \dot{I} = 0.6325 \angle -90^\circ V$$

电感上电压

$$\dot{U}_L = j\omega L \cdot \dot{I} = 0.6324 \angle 90^\circ V$$

转化为峰峰值，有：

$$V_{Crms} = 1.7890 V$$

$$V_{Lrms} = 1.7887 V$$

与仿真结果相近。

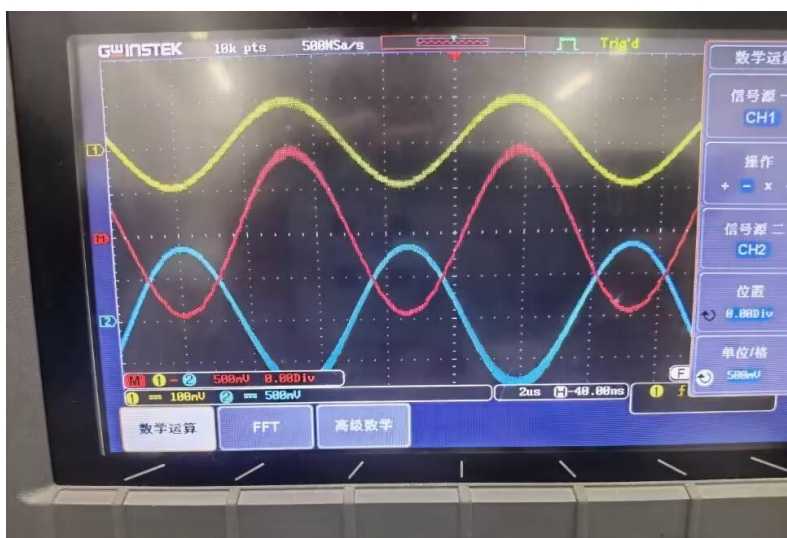
(3) 根据上述测量，试分析如何利用 RLC 谐振电路实现带通及带阻。

电容和电感并联实现带通电路；电感和电容器串联实现带阻电路。

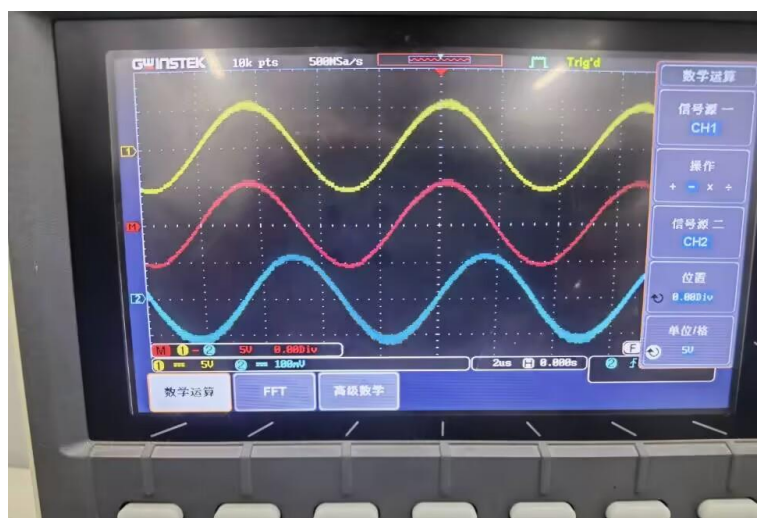
(4) 搭试实物电路，再现谐振现象，测量谐振频率，记录此时 U_R 、 U_L 、 U_C 值及波形。(验收)

理论推导如上文所述。记录相应实验值如下：

f_0	U_R	U_L	U_C
152.5kHz	11.256V	1.730V	1.792V



上图中，黄线为电容+电感的电压波形，蓝线为电感电压波形，红线为黄线与蓝线之差，即电容电压波形。



上图中，黄线为电阻的正极结点电压波形，蓝线为电阻的负极结点电压波形，红线为黄线与蓝线之差，即电阻电压波形。

观察可知，该频率下，电容电压与电感电压反相，电阻电压与电源电压同相，符合仿真结果。

(5) 分析比较软件仿真及实物实验结果的差异，分析产生差异的原因。

实验结果显示，波形与理论推导符合得很好，电感电压实验值与理论值稍有差异，但差异较小。产生差异的原因推测如下：

1. 元件参数值存在一定偏差，如电容并非绝对的 3.3nF 、面包板存在一定电阻，导致实际电路 f_0 并非理论值。
2. 电路触点接触不良，导致存在一定偏差。
3. 示波器读数误差。由于示波器 **measure** 功能显示的峰峰值随时间小幅度跳动，**Cursor** 功能测量时存在人为误差，导致读数部分存在一定误差。

四、实验总结

(实验出现的问题及解决方法、思考题(如有)、收获体会等)

这次实验中，我进行了较深刻的预习，使实验进行较为成功。实验过程中出现的两个问题是：

1.对信号源的操作还是不够熟悉。本次实验选择的信号源输出单位应是“Vrms”，经查阅为有效值。由于没有正确选择输出单位，导致波形显示不正确，并且无从调试。

2.对验证方案不清晰。也是对示波器不太熟悉。虽然在数电实验已经多次使用过示波器了，并且每一次都能够很熟练地将信号源与示波器的两个负极接地，课前仿真时也正确地使用了示波器，但实验时还是没有提前意识到示波器测的是结点电压，需要数学运算从而显示正确波形。

除此之外，本次实验较为成功，对 multisim 的使用也更加熟悉了。

思考题：

(1) Multisim 仿真电路中输入信号源起什么作用，改变信号源的参数对测试结果有无影响？

信号源起提供激励作用。改变信号源电压时，各器件波形幅值会相应改变，这是由于实验中所研究的元件无非线性电阻，交流电路中的阻抗可视为线性电阻，由齐性定理可知幅值对应改变。而改变频率时，对波形横轴间隔有影响。同时，若研究的电路为正弦交流电路，对阻抗值也有影响。在黑箱实验中可利用改变频率调整总阻抗为 0，谐振计算电路参数（提前预习了，嘿嘿）。

(2) 试写出判定 RLC 串联电路处于谐振状态的三种实验方法。

1.电感和电容电压有效值相同，反向。

2.电源电压、电阻电压相同。

3.相位判断：电容、电阻、电感相位依次减小 90° 。

4.电路电流在任意改变频率时都会变小，未知电路参数时也可用此方法。

(3) RLC 串联谐振电路实物实验中，信号源输出信号幅度该如何选择？测量过程中，信号源信号幅度有没有变化？

应选择适合测量的幅度值；没有变化。

(4) 在谐振频率点、及谐振频率左右，电路的特性有什么变化？

在截止频率点，电感和电容的串联阻值近似于 0，相当于短路。

在截止频率左右， $f < f_0$ 时，电路呈现容性， $f > f_0$ 时，电路呈现感性。

(5) 写出 RLC 并联电路处于谐振状态的特点。

五、参考资料（预习、实验中参考阅读的资料）

电路教学计划 2023